

Eau, changements climatiques, alimentation et évolution démographique

Water, climate change, food and population growth

Ghislain de Marsily

Volume 21, numéro 2, 2008

20^e anniversaire de la *Revue des Sciences de l'Eau*

URI : <https://id.erudit.org/iderudit/018460ar>

DOI : <https://doi.org/10.7202/018460ar>

[Aller au sommaire du numéro](#)

Éditeur(s)

Université du Québec - INRS-Eau, Terre et Environnement (INRS-ETE)

ISSN

0992-7158 (imprimé)

1718-8598 (numérique)

[Découvrir la revue](#)

Citer cet article

de Marsily, G. (2008). Eau, changements climatiques, alimentation et évolution démographique. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 21(2), 111–128. <https://doi.org/10.7202/018460ar>

Résumé de l'article

Cet article propose une vue d'ensemble des ressources en eaux à l'échelle mondiale, à l'horizon du milieu du XXI^e siècle. On considère d'abord les conséquences probables du changement climatique en ce qui concerne les événements moyens aussi bien qu'extrêmes. Des situations de pénurie d'eau et de sécheresse ainsi que d'augmentation des ressources en eaux sont examinées. On étudie combien d'eau il faudra pour produire la nourriture requise, à l'échelle mondiale, étant donné l'évolution démographique prévue, les modifications des modes d'alimentation et la concurrence entre productions alimentaire et bioénergétique. Les risques de pénuries alimentaires en cas de sécheresses mondiales sévères (par exemple pendant des événements El Niño très intenses) sont discutés. Les conséquences des changements climatiques et des besoins en nourriture pour la conservation des écosystèmes et de la biodiversité sont examinées. Des solutions possibles sont proposées.

EAU, CHANGEMENTS CLIMATIQUES, ALIMENTATION ET ÉVOLUTION DÉMOGRAPHIQUE

Water, climate change, food and population growth

GHISLAIN DE MARSILY^{1,2,3}

¹Université Pierre et Marie Curie, Paris 06, UMR 7619 SISYPHE, Case 105, 4, place Jussieu, 75252 Paris cedex 05, France

²CNRS, UMR 7619 SISYPHE, 75005 Paris, France

³Académie des Sciences, 75006 Paris, France

Reçu le 7 janvier 2008, accepté le 15 janvier 2008

Issu du colloque « 20^e anniversaire de la *Revue des Sciences de l'Eau* »

RÉSUMÉ

Cet article propose une vue d'ensemble des ressources en eaux à l'échelle mondiale, à l'horizon du milieu du XXI^e siècle. On considère d'abord les conséquences probables du changement climatique en ce qui concerne les événements moyens aussi bien qu'extrêmes. Des situations de pénurie d'eau et de sécheresse ainsi que d'augmentation des ressources en eaux sont examinées. On étudie combien d'eau il faudra pour produire la nourriture requise, à l'échelle mondiale, étant donné l'évolution démographique prévue, les modifications des modes d'alimentation et la concurrence entre productions alimentaire et bioénergétique. Les risques de pénuries alimentaires en cas de sécheresses mondiales sévères (par exemple pendant des événements El Niño très intenses) sont discutés. Les conséquences des changements climatiques et des besoins en nourriture pour la conservation des écosystèmes et de la biodiversité sont examinées. Des solutions possibles sont proposées.

Mots clés : *Ressources en eau globales, changements climatiques, démographie, alimentation, bioénergie, crises climatiques, crises alimentaires*

ABSTRACT

This paper provides a global look at the water resources at the World scale, with a perspective for the middle of the XXIst century. The likely consequences of climate change are first considered, for both average and extreme events. Situations of water scarcity and droughts, as well as water resource increase are considered. The global water needs for food production are discussed, given the predicted demographic growth, the potential diet changes and competition between food production and bio-energy production. The potential for major food shortages in case of severe global droughts (e.g. during very strong El Niño events) is discussed. The consequences of climate change and food requirements for ecosystems and biodiversity conservation are discussed. Potential solutions are listed.

Keywords: *Global water resources, climate change, demography, food production, bioenergy, climate crisis, food crisis*

*Auteur pour correspondance :

Téléphone : 33.1.4427.2373

Télécopieur : 33.1.4427.5125

Courriel : gdemarsily@aol.com

1. INTRODUCTION

En octobre 2006, l'Académie des Sciences a publié un « Rapport sur la science et la technologie » sous le titre « Les eaux continentales », préparé pour le gouvernement français, afin d'examiner quelques-uns des problèmes majeurs de l'eau, auxquels le Monde pourrait être confronté dans la seconde moitié de ce siècle. Le but de ce rapport était de déterminer les possibilités que surviennent dans le Monde des crises importantes liées à l'eau, et de proposer des actions possibles visant à éviter ou réduire l'impact de telles crises. Les risques anticipés étaient liés aux conséquences des changements climatiques affectant la disponibilité en eau, ainsi qu'à l'augmentation de la population mondiale, à l'impact de la société sur les écosystèmes aquatiques, à une détérioration potentielle de la qualité de l'eau potable et à l'accroissement du nombre de mégapoles (ayant plus de dix millions d'habitants), principalement dans les pays en voie de développement. Nous ne traiterons ici que de la question du changement climatique, en nous fondant aussi sur les derniers résultats des travaux du Groupe International d'Étude du Climat (GIEC, 2007), et de celle de l'accroissement de la population du point de vue des besoins en eau pour la production alimentaire, dans des situations moyennes ou en cas de sécheresse, et finalement de l'impact de la société sur les écosystèmes.

2. CHANGEMENT CLIMATIQUE

Depuis le début de la révolution industrielle, les humains ont considérablement modifié la concentration des gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère, principalement le CO_2 , le CH_4 et le N_2O , facilitant ainsi la rétention dans l'atmosphère des émissions infrarouges de la terre, provoquant, jusqu'ici, une augmentation du flux de chaleur terrestre de $2,3 \text{ W/m}^2$ depuis 1750. Pour le XXI^e siècle, des scénarios d'émissions ont été développés par le GIEC, qui a aussi calculé leur impact sur les concentrations en CO_2 dans l'atmosphère, présentées sur la figure 1, et leurs conséquences climatiques. Il est important de noter que la variabilité de la concentration en CO_2 entre les scénarios est assez faible jusqu'en 2050, mais devient tout à fait significative en 2100 en fonction de l'efficacité des efforts de réduction des émissions.

Une des conséquences de ces concentrations de GES est une augmentation moyenne estimée de la température à la surface de la Terre de $0,74^\circ\text{C}$ au cours des 100 dernières années. La figure 2 montre, par exemple, l'évolution de la température moyenne d'été en France, mesurée de 1860 à 2003 et prédite jusqu'en 2100, basée sur le GIEC scénario A2 sans aérosols, ce qui est un scénario moyen. On peut y voir, par exemple,

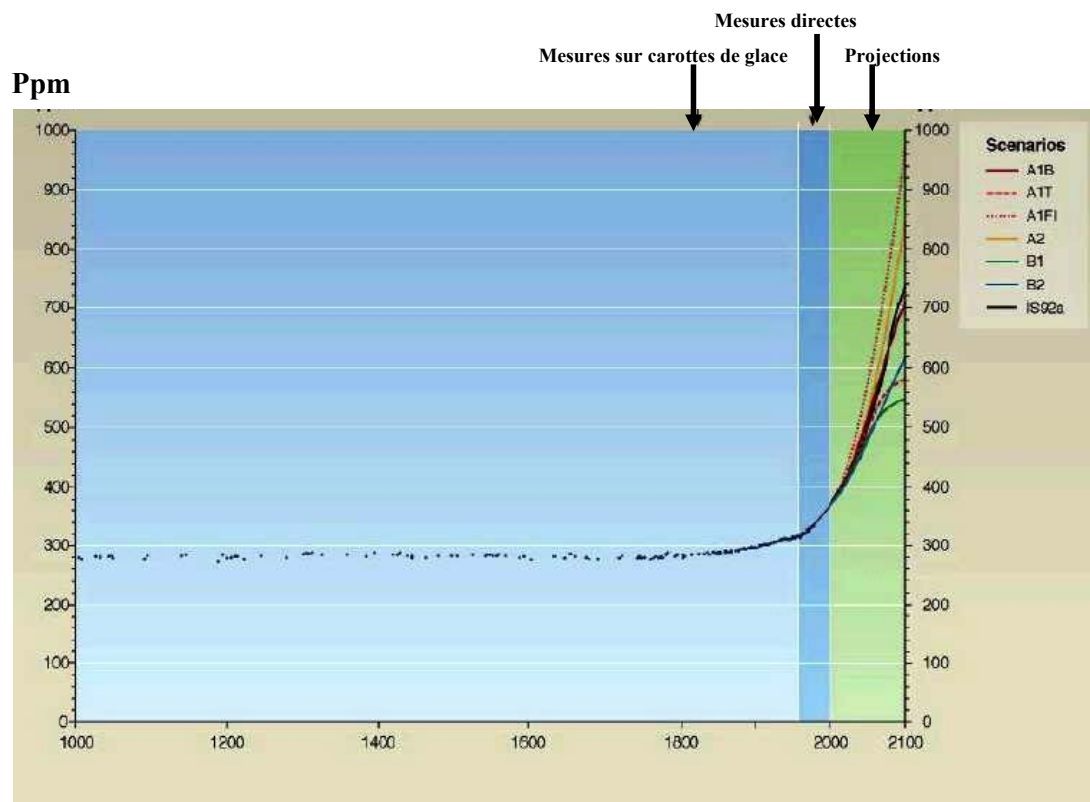


Figure 1. Concentration de CO_2 atmosphérique, passée et future pour 8 scénarios différents d'émissions de CO_2 , d'après le GIEC (2001).
Past and future CO_2 atmospheric concentration for 8 different scenarios of CO_2 emission, from IPCC (2001).

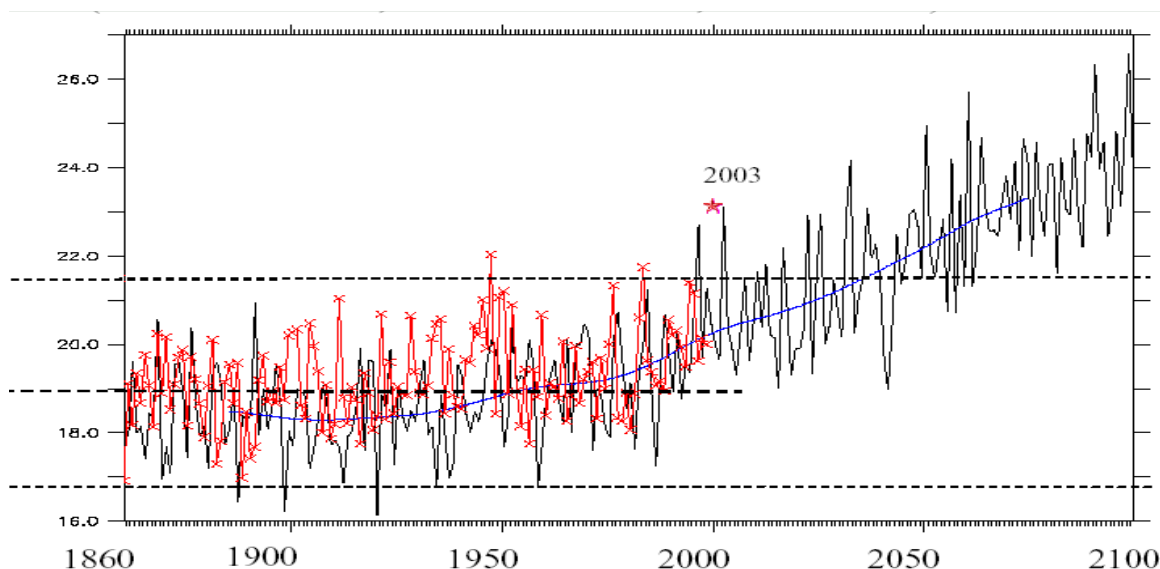


Figure 2 Évolution de la température moyenne d'été en France de 1860 à 2100. Mesures jusqu'en 2003, prédictions avec le modèle IPSL, scénario GIEC SRES A2, sans aérosols (d'après DUFRESNE *et al.*, 2002, dans Académie des Sciences, 2006).

*Evolution of the mean summer temperature in France from 1860 to 2100. Measurements until 2003, predictions with the IPSL model, IPCC SRES A2 scenario, without aerosols (from DUFRESNE *et al.*, 2002, in Académie des Sciences, 2006).*

que la canicule de 2003 se situerait dans la fourchette des étés normaux dans la seconde moitié du XXI^e siècle.

L'analyse conduite par l'Académie des Sciences (2006) conclut à dire que les effets des changements climatiques durant le siècle à venir sont relativement bien prédits en ce qui concerne la température, en fonction, évidemment, du scénario des émissions des GES, mais que leurs effets hydrologiques sont bien moins certains. Néanmoins, la prédiction actuelle est que la hausse de la température générerait une accélération significative du cycle de l'eau avec une évaporation plus forte et une augmentation de la quantité de vapeur d'eau présente dans la troposphère tandis que l'humidité relative resterait plus ou moins constante. Les précipitations globales seraient donc plus abondantes, mais leur distribution dans l'espace est beaucoup moins certaine puisqu'elle dépend fortement des hypothèses posées dans les modèles, ainsi que de la présence d'aérosols qui dépend de l'activité humaine, de la circulation atmosphérique et des émissions volcaniques.

La figure 3 est une description de la distribution zonale des précipitations moyennes (de pôle à pôle) pour le climat actuel mesuré (trait noir épais) et pour celui calculé à l'actuel avec 15 modèles climatiques différents. On observe une grande variabilité entre les modèles, ce qui explique en partie pourquoi les prédictions des modèles concernant les précipitations des climats futurs sont si peu certaines. Les conséquences générales prévues du changement climatique seraient un déplacement vers les pôles des zones climatiques, comme le montre le trait rouge épais sur la figure 3. Les zones désertiques du Monde,

présentées à la figure 4, se déplaceraient vers le nord dans l'hémisphère nord, et vers le sud dans l'hémisphère sud. Simultanément, il pleuvrait plus aux latitudes septentrionales et sous les tropiques.

Ces changements sont illustrés par la figure 5, qui montre les changements des précipitations (en mm/j et en %), depuis la seconde moitié du XX^e jusqu'à la seconde moitié du XXI^e siècle, pour les mois de décembre à mars (à gauche) et de juin à septembre (à droite), calculées par le modèle CNRM de Météo-France pour le scénario B2 du GIEC. Les mêmes résultats fournis par le dernier rapport du GIEC (2007), à partir d'une moyenne de différents modèles, s'accordent assez bien avec ces valeurs. Le tableau 1 présente une estimation des changements de précipitations empruntée à la figure 5 pour plusieurs régions d'Europe, d'Afrique et d'Amérique.

Outre les changements des précipitations moyennes décrits ci-dessus, la question de la variabilité du climat a également été examinée par l'Académie des Sciences (2006) et par le GIEC (2007). La probabilité que des événements extrêmes se produisent sera-t-elle différente de ce qu'elle est aujourd'hui?

La figure 6 est une représentation schématique des évolutions potentielles de la loi de probabilité d'occurrence d'un événement hydrologique quelconque, tel que les précipitations annuelles, le débit d'une rivière, etc. La distribution bleue représente le climat actuel, avec sa moyenne « m ». En moyenne, la précipitation annuelle est m, mais une précipitation de m/2, par exemple, est un événement qui se produit, selon ce schéma, avec une fréquence de 10 %, etc. Les courbes décrivent la

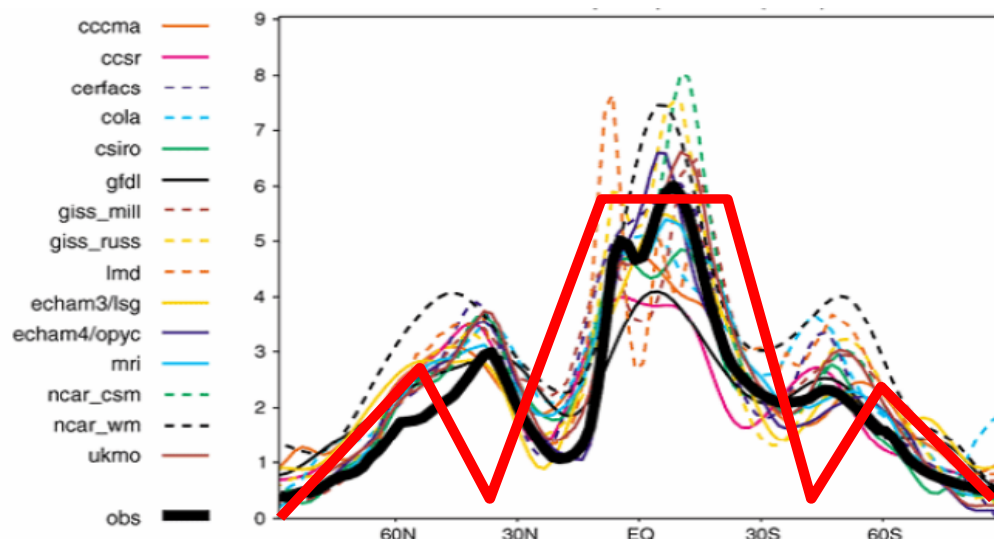


Figure 3. Précipitations zonales moyennes (mm/j) pour décembre, janvier, février pour le climat actuel, observées (trait noir épais) et calculées par 15 modèles.

Le trait rouge épais est une représentation schématique des changements des précipitations pour le climat de la fin de ce siècle (adaptées d'après Lambert et Boer, 2001, dans Académie des Sciences, 2006).

Mean zonal precipitation (mm/d) for December, January, February, for the current climate, observed (thick black line) and calculated with 15 models.

The tick red line is a schematic representation of the precipitation changes for the climate at the end of the century (Adapted from Lambert and Boer, 2001, in Académie des Sciences, 2006).

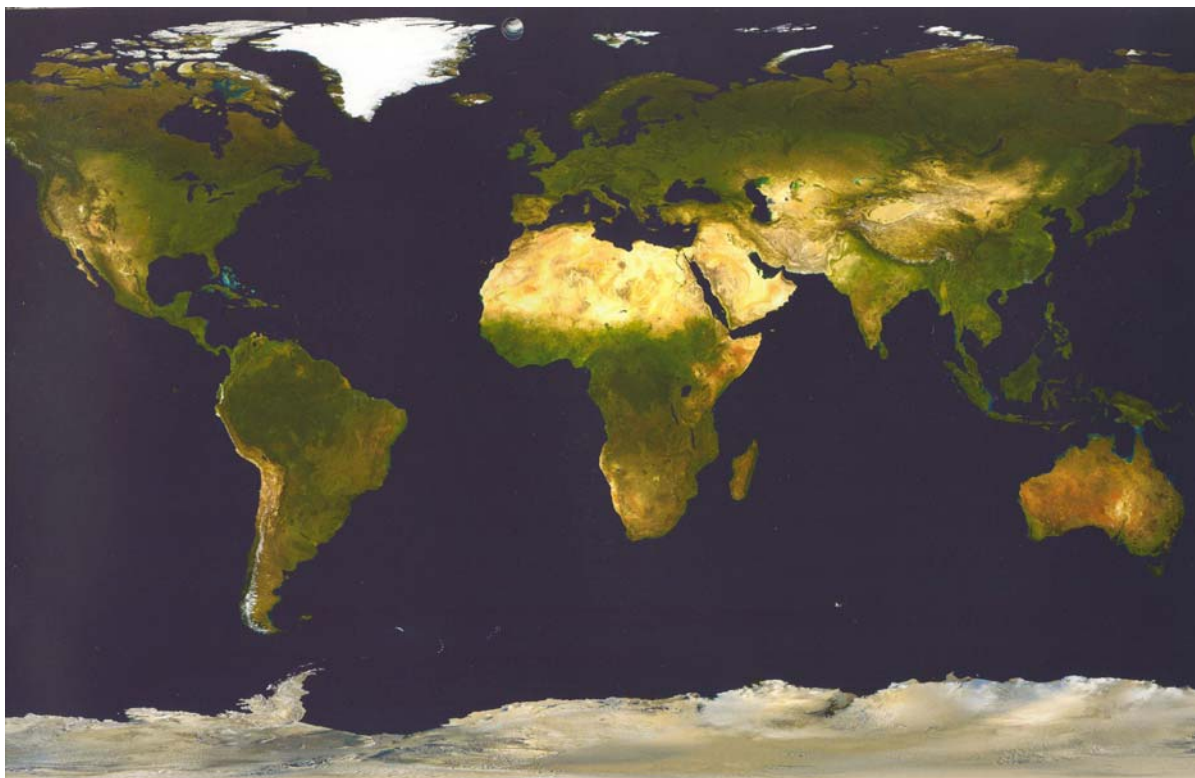


Figure 4. Régions désertiques dans le Monde actuel.
Dry areas of the World today.

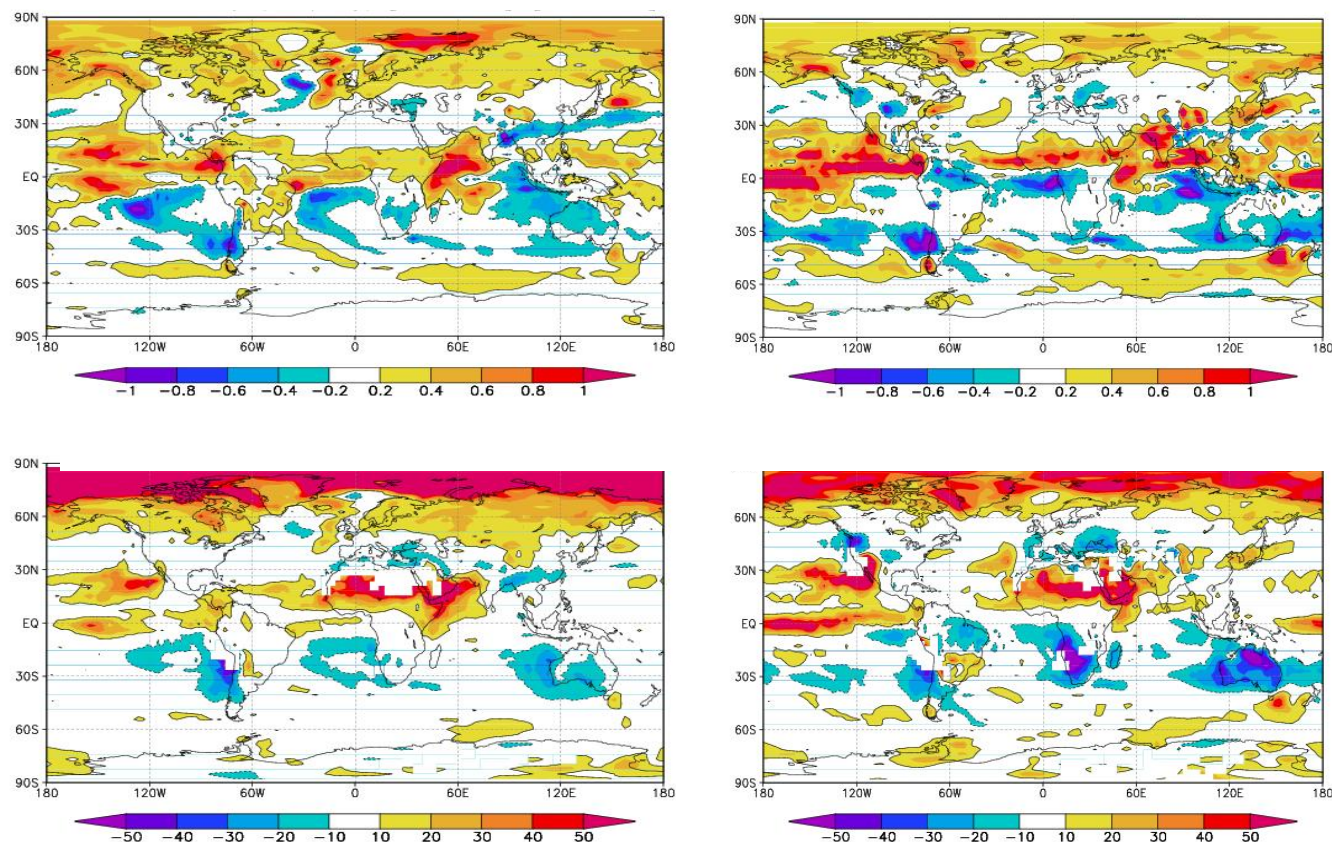


Figure 5. Anomalies des précipitations (haut: mm/j, bas: %) calculées pour le scénario B2 du GIEC avec le modèle français CNRM, comparant les moyennes des années 1950-1999 et 2050-2099. A gauche: décembre à mars. A droite: juin à septembre. (Académie des Sciences, 2006).

Precipitation anomalies (top : mm/d, bottom : %) calculated for the IPCC B2 scenario with the French CNRM model, comparing the averages for years 1950-1999 and 2050-2099. Left : for December to March. Right : for June to September. (Académie des Sciences, 2006).

Tableau 1. Changements des précipitations en % pour différentes zones climatiques, seconde moitié du 21^{ème} siècle par rapport à la seconde moitié du 20^{ème} siècle.

Table 1. Precipitation changes in %, for different climate zones, second half of 21st century compared to the second half of the 20th century.

Zone Géographique	Décembre à Mars	Juin à Septembre
Afrique Equatorial	+25 %	+10 %
Sahel Africain	Incertain, +/- 10 %	+30 %
Afrique du Nord	-15 %	-10 %
Europe du Sud	Incertain, +/-10 %	-20 %
France en moyenne	+15 %	Incertain, +/- 10 %
Europe du Nord	+25 %	+15 %
Amérique du Nord	+/-10 %	+/-10 %
Nord Canada	+20 %	+/-10 %

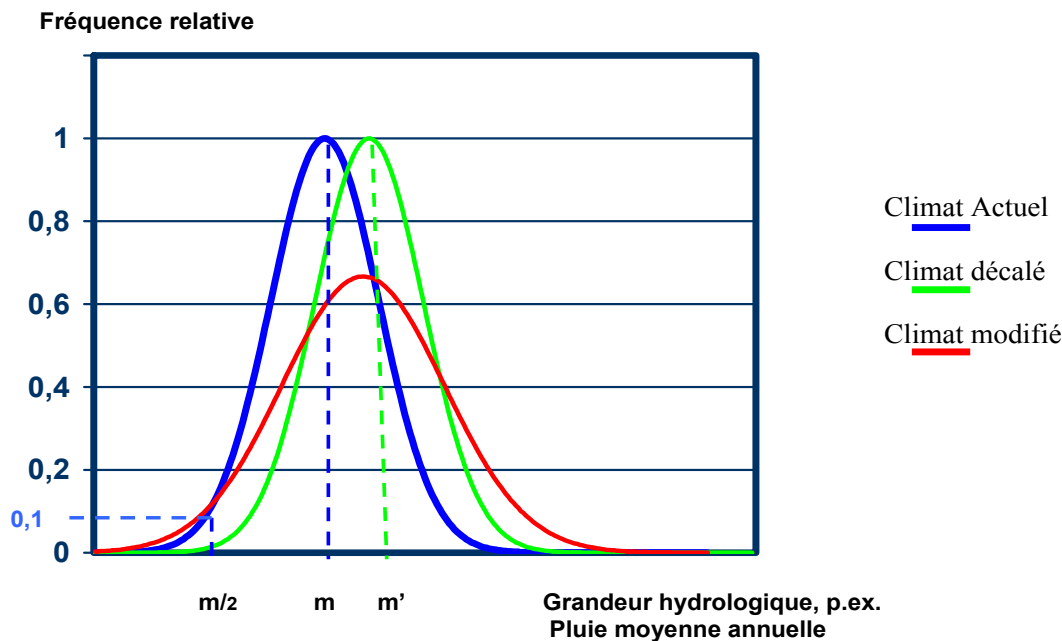


Figure 6. Représentation schématique de la variation de la probabilité d'occurrence d'événements extrêmes avec les changements climatiques, pour le climat actuel, pour un climat plus humide (décalée) et une variabilité modifiée (adapté d'après l'Académie des Sciences, 2006).

Schematic representation of the probability of occurrence of extreme events for climate changes, with current climate, a more humid climate (shifted), and a modified variability (Adapted from Acad. Sciences, 2006).

probabilité de sécheresses sur le côté gauche, et de crues sur le côté droit, par rapport à la moyenne.

Les climatologues acceptent de dire que si les précipitations moyennes augmentent, et deviennent m' au lieu de m , il est très probable que toute la distribution sera décalée vers la droite, comme le montre la courbe verte sur la figure 6. Dans ce cas, la probabilité de crues serait plus forte et celle de sécheresses plus faible. En revanche, si la courbe verte avec une moyenne de m' était celle d'aujourd'hui, et si elle était décalée vers la gauche, devenant ainsi la courbe bleue, avec une décroissance de la moyenne m , la probabilité de sécheresses croîtrait et celle de crues décroîtrait. Cependant, ce qui est inconnu, c'est si le déplacement de la moyenne, m à m' , affecterait aussi la forme de la distribution, en la modifiant par exemple pour qu'elle devienne la courbe rouge sur la figure 6. Dans ce cas, la probabilité de crues aussi bien que celle de sécheresses pourrait augmenter. Le dernier rapport du GIEC (WG1, chapitre 3, 2007) indique que, selon les observations, une augmentation de la variabilité du climat paraît fortement probable, c'est-à-dire qu'il y aurait à la fois un décalage de la distribution et un changement de forme, avec une variabilité plus forte. Malheureusement, à l'heure actuelle, les modèles climatiques ne sont pas capables de répondre à cette question, ces changements ne peuvent être déduits que des observations, mais cela demande bien évidemment des séries de temps très longues.

Ces changements sont, comme nous l'avons vu, très incertains et pourraient peut-être survenir avant 2050. Les conséquences majeures sur la distribution des ressources en eaux mondiales, pendant ce siècle, semblent être:

Pour l'Europe du Sud, les zones des latitudes méditerranéennes, l'Amérique du Sud et l'Australie du Sud

- Une baisse importante, en moyenne, de la teneur en eau du sol (évapotranspiration plus forte causée par l'augmentation de la température et des précipitations plus faibles, particulièrement en été), ce qui veut dire qu'il faudra plus d'eau pour l'irrigation, si la production agricole doit être maintenue à son niveau actuel.
- Risques accrus de sécheresses édaphiques (agricoles) survenant pendant les mois de printemps et d'été et affectant principalement la végétation.
- Risques accrus de sécheresses hydrologiques se produisant en automne et en hiver et compromettant l'alimentation des aquifères, et ainsi le débit des rivières le reste du temps; cependant, les risques sont probablement plus faibles que ceux des sécheresses édaphiques, puisque la diminution des précipitations concerne principalement les mois d'été.
- Risques plus forts de crues, des précipitations intenses devenant probablement plus fréquentes.
- Risques accrus d'incendies de forêts.

Pour l'Europe du Nord, le Nord de la Russie, Amérique du Nord, zones de l'Equateur

- Des ressources en eaux plus abondantes, aussi bien en été qu'en hiver.
- Risques plus grands de crues, particulièrement en hiver.
- Possible augmentation des risques de sécheresse.

En général

- Fonte des glaces dans les Alpes (ainsi que dans les Rocheuses, l'Himalaya, les Andes, etc.) et sur les marges des calottes polaires (mais peut-être accroissement des glaces aux pôles, dû à des précipitations plus fortes).
- Augmentation de la température à la surface de la mer, ce qui entraînerait probablement une intensification (en force et en fréquence) des ouragans dans les zones tropicales.
- Fréquence accrue des événements El Niño - La Niña? Ceci se discute encore, mais affecterait surtout la zone de moussons.
- Augmentation du niveau de la mer (approximativement 0,50 m en 2050, actuellement 3 mm/an), dû au réchauffement général des mers (expansion thermique) et à la fonte des glaces.
- On parle aussi parfois d'un effet possible sur le Gulf Stream; cela ferait baisser la température en Europe et en Amérique du Nord, mais c'est très incertain, et la date potentielle d'occurrence est inconnue; toutefois, cette baisse ne compenserait pas l'augmentation générale de la température.

3. PÉNURIE EN EAU

Ces changements dans le cycle de l'eau doivent maintenant être comparés aux besoins en eau actuels. Le tableau 2 présente la distribution de la population mondiale en fonction des ressources en eaux disponibles : On voit clairement que les problèmes majeurs de ressource en eau existent déjà dans les steppes et les zones arides du monde, où approximativement 21 % de la population mondiale reçoivent 2,2 % du débit mondial des rivières. Le tableau 3, adapté d'après SHIKLOMANOV (1999) et ACADÉMIE DES SCIENCES (2006), offre une estimation de la demande en eau (prélèvements et consommation) à l'échelle mondiale, de 1900 à 2050 (fondée sur des tendances observées seulement après 2000), à laquelle a été ajoutée une estimation de la consommation en eau par l'agriculture pluviale. Le tableau 4 est une distribution par continent de ces chiffres pour l'année 2000. Tous sont évidemment des estimations grossières qui ne concordent pas entièrement entre les tableaux 3 et 4. Enfin, la figure 7 (IWMI, 2007) donne une estimations de la « pénurie en eau » actuelle, qui est définie comme une « pénurie physique », quand la consommation en eaux est supérieure à 75 % ou 60 % de la ressource, et comme une « pénurie économique », quand l'eau est disponible mais les outils et le développement nécessaires pour permettre son utilisation ne sont pas réunis.

Si nous essayons de comparer ces données à l'impact du changement de climat, il apparaît que la région la plus affectée sera la zone aride, où la ressource en eaux est déjà

Tableau 2. Classification des climats d'après VIVIROLI *et al.*, 2007; A: Part de la superficie continentale (total : 133,6 millions de km²); POP : Part de la population mondiale (total : 6,2 milliards d'individus en 2000); Q : Part du débit mondial (total: 40 606 km³a⁻¹); q : ruissellement moyen; l'Antarctique et les parties glaciaires de Groenland sont exclus.

Table 2. Climate classification taken from VIVIROLI *et al.* 2007; A: Share in continental surface area (total: 133.6 million km²); POP: Share in global population (total: 6.2 billion people in 2000); Q: share in global discharge (total: 40,606 km³ y⁻¹); q: Average runoff; Antarctica and glaciated parts of Greenland are excluded.

Climat	Zones de vie agrégées de Holdridge	A (%)	POP (%)	Q (%)	q (mm a ⁻¹)
Polaires et froid	Toundra et polaire; Cold Parklands	14,8	3,2	11,9	245
Frais	Forêt et toundra, forêt boréale	11,3	4,0	11,6	313
Tempéré	Forêt tempérée et chaude	9,9	23,3	15,2	465
Steppes	Steppe; Chaparral	9,7	13,6	1,9	59
Aride	Désert frais et chaud	18,5	7,9	0,3	5
Sub-tropical	Tropical semi-aride, forêt tropicale sèche	18,3	24,8	8,8	147
Tropical humide	Forêt tropicale saisonnière, forêt tropicale humide	17,5	23,2	50,3	872

Tableau 3. Demande en eau de 1900 à 2050, adaptée d'après SHIKLOMANOV (1999) et ACADÉMIE DES SCIENCES (2006).**Table 3. Water demand from 1900 to 2050, adapted from SHIKLOMANOV (1999) and ACAD. SCIENCES (2006).**

Demande en eau	1900	1950	1980	1990	2000	2025	2050
Population (millions)	2 000	2 542	4 410	5 285	6 181	8 000	9 200
Surfaces irriguées, M Ha	47,3	101	198	243	264	307	331
Prélèvements agricoles, km ³ /a	513	1 080	2 112	2 425	2 605	3 053	3 283
Consommation agricole, km ³ /a	321	722	1 445	1 991	1 834	2 143	2 309
Rapport consommation/prélèvements	63 %	67 %	68 %	70 %	70 %	70 %	70 %
Prélèvements domestiques, km ³ /a	21,5	86,7	219	305	384	522	618
Consommation domestique, km ³ /a	4,6	16,7	38,3	45	52,8	73,6	86,4
Rapport consommation/prélèvements	21 %	19 %	17 %	15 %	14 %	14 %	14 %
Prélèvements industriels, km ³ /a	44	204	713	735	776	834	875
Consommation industrielle, km ³ /a	5	19	71	79	88	104	116
Rapport consommation/prélèvements	11 %	9 %	10 %	11 %	11 %	13 %	13 %
Évaporation par les barrages, km ³ /a	0,3	11,1	131	167	208	302	362
Prélèvements totaux annuels, km ³ /a	579	1 382	3 175	3 632	3 973	4 710	5 138
Consommation totale, km ³ /a	330	758	1 554	1 815	1 975	2 321	2 511
Agriculture pluviale, km ³ /a					5 000	7 000	9 000

Tableau 4. Prélèvements et consommation d'eau en 2000 (adapté d'après MARSILY, 2000).**Table 4. Water withdrawal and consumption for 2000 (adapted from MARSILY, 2000).**

Tous chiffres en km ³ /a	Population millions	Pluie	Écoulement total	Écoulement de base	Prélèv. domestiques	Consom. agriculture pluviale	Prélèv. agriculture irriguée	Consom. agriculture irriguée	Prélèv. industriels
Europe	712	7 165	3 110	1 065	120	1 120	550	390	380
Asie	3 722	32 690	13 190	3 410	310	1 850	2 000	1 380	425
Afrique	853	20 780	4 225	1 465	40	320	200	140	32
Amérique du Nord	489	13 910	5 960	1 740	130	940	400	280	390
Amérique du Sud	367	29 355	10 380	3 740	50	650	100	70	105
Australie, Iles du Pacifique	30	6 405	1 965	465	8	120	25	20	3
TOTAL	6 200	110 305	38 830	11 885	658	5 000	3 275	2 280	1 335
Consommation					90	5 000	-	2 280	170

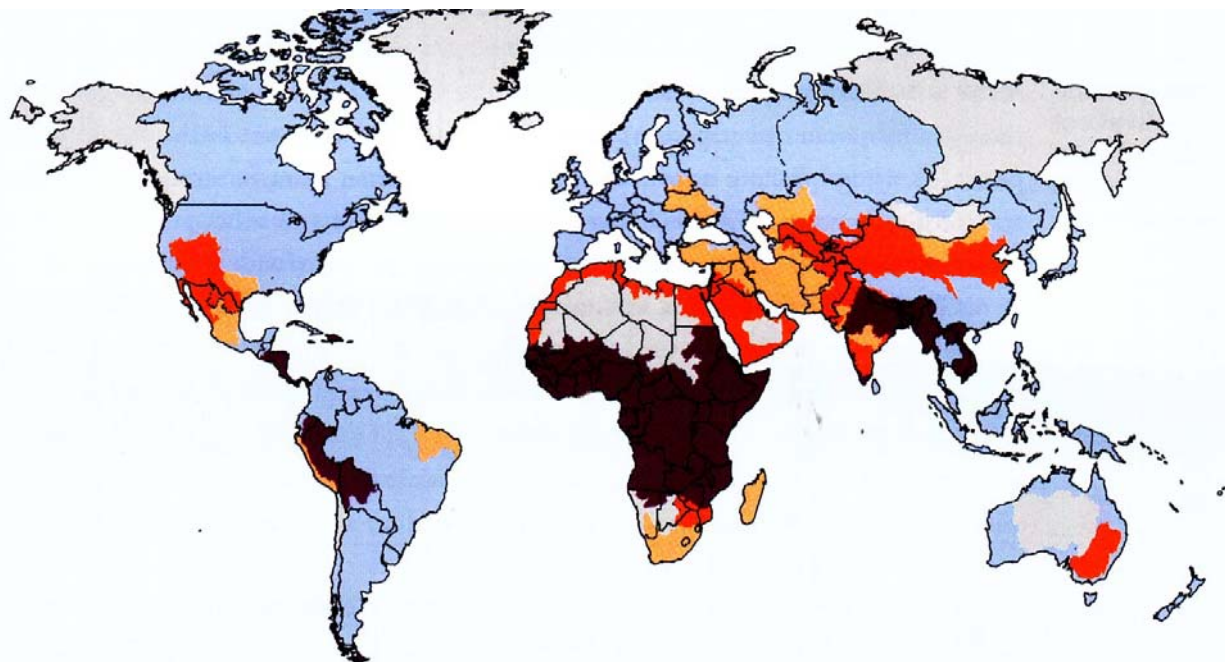


Figure 7. (D'après IWMI, 2007) : Régions avec pénuries en eaux physiques et économiques. Bleu - Peu ou absence de pénurie en eau : Ressources en eaux abondantes par rapport à l'usage avec moins de 25 % du débit des rivières prélevés pour des besoins de la population; Rouge - Pénurie en eau physique : Plus de 75 % du débit des rivières prélevés pour les besoins de l'agriculture, l'industrie ou l'usage domestique (y compris le recyclage des écoulements d'eau usée); Vert - Proche de la pénurie en eau physique : Plus de 60 % des débits des rivières sont prélevés. Ces bassins souffriront de pénurie en eau physique dans un avenir proche; Noir - Pénurie d'eau économique : Un manque de capitaux humains, institutionnels et financiers limite l'accès à l'eau, bien que, dans la nature, cette eau soit disponible localement pour répondre aux demandes de la population. Moins de 25 % de l'eau des rivières sont prélevés pour les besoins des habitants, mais la malnutrition sévit.

(From IWMI, 2007) *Areas of physical and economic water scarcity. Blue - Little or no water scarcity: Abundant water resources relative to use, with less than 25% of water from rivers withdrawn for human purposes; Red - Physical water scarcity: More than 75% of the river flows are withdrawn for agriculture, industry and domestic purposes (accounting for recycling of return flows); Brown - Approaching physical water scarcity: More than 60% of river flows are withdrawn. These basins will experience physical water scarcity in the near future; Black - Economic water scarcity: Human, institutional and financial capital limit access to water even though water in nature is available locally to meet human demands. Less than 25% of water from rivers withdrawn for human purposes, but malnutrition exists.*

très faible, où la population augmente et où les précipitations vont probablement diminuer. Il est clair aussi que, comparée aux besoins agricoles, la consommation d'eau domestique ne présentera jamais, dans des conditions normales, un problème majeur, puisqu'elle concerne de petits volumes, et que de l'eau « chère » peut être fournie (transportée sur de longues distances, dessalée, recyclée). L'eau nécessaire à l'industrie et à la production d'énergie peut parfois présenter un problème, mais le souci principal sera l'eau pour l'agriculture. Ceci sera discuté ci-dessous.

Une prévision succincte pour l'Europe a été préparée récemment par la Commission Européenne (2007) visant la situation en 2030. Le tableau 5 donne les chiffres pour 2000 et 2030 de l'UE 30, c'est-à-dire les 27 états membres de l'Union Européenne ainsi que la Bulgarie, la Roumanie et la Turquie.

La ressource en eau « disponible » dans l'UE30 est estimée à environ 2 000 km³/a, représentant l'eau disponible dans les rivières et les aquifères, non pas celle utilisée en agriculture pluviale, estimée à 870 km³/a, ni les précipitations alimentant les écosystèmes terrestres (forêts, prairies, zones humides, etc.) qui sont de l'ordre de 800 km³/a. Globalement, l'UE30 prélève environ 12 % de la ressource « disponible » et en consomme 3,5 % tandis qu'elle utilise approximativement 55 % de son flux d'évapotranspiration pour son agriculture pluviale et 45 % pour ses écosystèmes naturels. En 2030, selon les documents de l'UE, le prélèvement total (y compris l'irrigation) devrait décroître, et la consommation monter à 4 %, tandis que l'agriculture pluviale croîtrait de 10 %. Bien entendu, le chiffre global actuel de 12 % de prélèvements des ressources couvre de grandes variations au sein de l'UE (de 53 % à Chypre, 32 % en Espagne, à moins de 2 % en Scandinavie, aux Pays Baltes, en

Tableau 5. Prélèvements/consommation d'eau en Europe, 2000 et 2030. Adapté de ÉCOLOGIC, 2007.
Table 5. Water withdrawal/consumption in Europe, 2000 and 2030. Adapted from ECOLOGIC, 2007.

Chiffres en km ³ /a	Prélèvement total	Eau domestique	Eau d'irrigation, (eau bleue)	Agriculture pluviale (eau verte)	Eau industrielle	Eau pour l'énergie
EU30, Prélèvements, 2000	251	63	65	~870	34	89
EU30, Consommation, 2000	~939	~5	~49	~870	~5	~10
EU30, Prélèvements, 2030	208	61	74	~900	46	27
EU30, Consommation, 2030	~971	~5	~56	~900	~7	~3

Hongrie, etc.). Notez qu'à l'échelle mondiale, le seuil de pénurie en eau se situe à 75 % de prélèvements et 60 % constitue une situation alarmante, tandis que 25 % est considéré comme « abondant » (IWMI, 2007; voir Figure 7).

La figure 8, d'après ECOLOGIC (2007), présente une estimation de la « pénurie en eau » en Europe, à l'horizon de 2030, en prenant en compte aussi bien l'évolution de la demande en eau qu'un des scénarios de changement climatique du GIEC (IS92A). Cependant, cette « pénurie » est définie comme le rapport des « prélèvements d'eau » sur la « disponibilité en eau en rivières » et calculée à l'échelle des bassins versants. On considère trois classes de pénurie : 0-20 %, 20-40 %, >40 %. Contrairement à IWMI, ce « taux de pénurie » ne prend pas en compte la consommation, et néglige donc le recyclage de l'eau

dans le réseau hydrographique ainsi que l'agriculture pluviale. Trois conclusions peuvent être tirées de ces comparaisons :

- (i) En Europe du Nord, le changement de climat (pluviométrie accrue) et les prélèvements prévus (baisse générale due à la technologie) réduiront la pénurie à moins de 20 % dans la plupart des bassins et la consommation à moins de 4 %, au moins dans des conditions normales.
- (ii) Le taux de pénurie en eau est un très mauvais indicateur et ne devrait pas être utilisé au niveau des décisions, puisqu'il ne prend en compte ni la consommation nette, ni l'agriculture pluviale.
- (iii) Dans des conditions normales, les problèmes d'eau les plus graves se produiront dans les états du sud de l'Europe où l'agriculture pluviale sera sérieusement affectée, à cause de

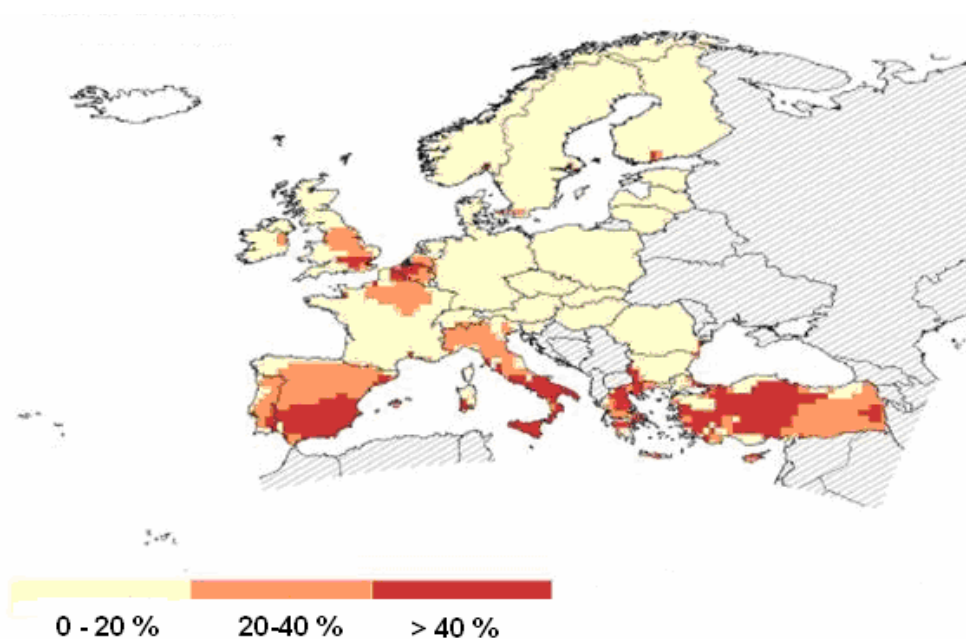


Figure 8. Taux de pénurie en eau en Europe en 2030, d'après ECOLOGIC (2007) et Center for Environmental Systems Research, University of Kassel, August 2004, WaterGAP 2.1e. Rapport prélèvements sur disponibilité par bassin, scénario de base LREM-E.
Water stress ratio in Europe in 2030, from ECOLOGIC (2007) and Center for Environmental Systems Research, University of Kassel, August 2004, WaterGAP 2.1e. Withdrawal-to-availability ratio per basin, baseline LREM-E scenario.

la diminution des précipitations, et l'agriculture irriguée gagnera du terrain, exigeant plus d'eau. La figure 8 montre les zones correspondantes en 2030 : le sud de l'Espagne et de l'Italie, la Grèce et la Turquie. Toutefois, le taux de pénurie n'est pas significatif pour estimer réellement la pénurie.

4. L'EAU AGRICOLE

4.1 Production alimentaire

Outre la disponibilité de l'eau, l'augmentation de la température et de la concentration en CO_2 dans l'atmosphère affecteront également l'agriculture. On a estimé (GIEC, 2007), qu'à une augmentation de 1 à 3 °C, correspondront une croissance de la productivité aux latitudes nord et une diminution au sud (ainsi que dans les tropiques). Pour une augmentation de plus de 3 °C, on s'attend à une baisse générale de la productivité.

À l'échelle mondiale, la nourriture constituera un problème majeur à cause de la croissance démographique. Il est prévu qu'en 2050, le Monde comptera environ 9 milliards d'habitants. Etant donné que déjà aujourd'hui, 850 millions d'individus ne reçoivent pas assez de nourriture pour leurs besoins élémentaires, la production alimentaire doit croître pour satisfaire aux besoins

de 2050. Le tableau 6 donne l'augmentation nécessaire de la production alimentaire en tenant compte des changements anticipés des régimes alimentaires (voir Tableau 10) et de la distribution des âges dans la population (COLLOMB, 1999; GRIFFON, 2006). Pour produire cette nourriture, il faut des terres cultivables. Le tableau 7 présente la superficie disponible pour l'agriculture par continent. Il faut d'abord considérablement améliorer l'efficacité des pratiques, aussi bien pour l'agriculture pluviale que pour celle qui est irriguée, mais ceci ne suffit pas. Il faut se rappeler que les engrais deviendront peut-être beaucoup plus chers (les nitrates suivent le prix du pétrole et les réserves de phosphates peuvent s'épuiser).

À l'heure actuelle, le taux de croissance des superficies irriguées est de 1,34 Mha a^{-1} . Comme les terres irriguées couvraient 234 Mha en 2000, leur superficie serait de 331 Mha en 2050, ce qui ne sera pas suffisant pour nourrir neuf milliards d'individus. Si le taux d'extension actuel des terres irriguées n'est pas multiplié par dix environ, l'irrigation ne pourra pas satisfaire aux besoins de nourriture en 2050; l'alimentation dépendra donc de l'agriculture pluviale. Toutefois, il apparaît clairement à la lecture des tableaux 6 et 7 que certaines régions n'ont pas suffisamment de terres cultivables, en particulier, l'Asie et le Moyen-Orient - l'Afrique du Nord, où le facteur multiplicateur alimentaire est très important (environ 2,5) avec une population, qui représente plus de la moitié du total mondial : ils utilisent déjà, respectivement, 75 % et 87 % de leurs terres cultivables.

Tableau 6. Besoins alimentaires en 2000 et estimés pour 2050, en Mt a^{-1} de céréales (GRIFFON, 2006).
Table 6. Food needs in 2000 and estimated for 2050, in Mt y^{-1} cereals (GRIFFON, 2006).

Régions	Asie	Amérique Latine	Moyen-Orient Afrique du Nord	Afrique Sub-Saharienne	OCDE et Russie
Besoins alimentaires, 2000	1 800	272	154	262	-
Besoins alimentaires, 2050	4 150	520	390	1 350	~ 2000
Facteur multiplicatif 2050/2000	2.34	1.92	2.5	5.14	~1

Tableau 7. Superficie cultivée en 2000 (Mha) et superficie apte aux cultures (FAO, dans GRIFFON, 2006).
Table 7. Cultivated area in 2000 (Mha) and area suitable for agriculture (FAO, in GRIFFON 2006).

Zones	Monde	Asie	Amérique Latine	Moyen-Orient Afrique du Nord	Afrique Sub-Saharienne	Russie	OCDE
Surface Ccltivée (2000) (a)	1 600	439	203	86	228	387	265
Surface cultivable (b)	4 152	585	1 066	99	1 031	874	497
a/b	39 %	75 %	19 %	87 %	22 %	44 %	53 %

La conclusion principale de ce tour d'horizon est donc que la production alimentaire viendra vraisemblablement d'une augmentation importante de l'agriculture pluviale, dans les régions où il y a encore des terres disponibles : principalement l'Amérique du Sud et l'Afrique, tandis que d'autres régions, telles que l'Asie et le Moyen-Orient - Afrique du Nord, ne pourront pas elles-mêmes satisfaire leur besoins alimentaires. Le tableau 8 présente un scénario possible de production alimentaire, qui pourrait satisfaire la demande de nourriture en 2050; d'après GRIFFON (2006). Ce scénario suppose des changements technologiques significatifs afin d'améliorer l'efficacité (+50 % et +30 % de la culture pluviale et irriguée, respectivement, en Asie, Amérique Latine et Afrique Sub-Saharienne), un investissement faible dans l'irrigation, une augmentation considérable de la superficie de l'agriculture pluviale en Afrique (pour satisfaire la demande sur ce continent) et en Amérique Latine pour compenser les manques en Asie et Moyen-Orient - Afrique du Nord, qui ne peuvent suffire à elles-mêmes.

Dans le tableau 9, le même scénario suppose que, en outre, une partie des terres est utilisée pour produire de l'énergie. Ce scénario prédit que la superficie de terres cultivées augmentera de 1,574 milliards d'hectares en 2000 (1,34 pluviales + 0,234 irriguées) à 3,152 milliards d'hectares

en 2050, comprenant 2,587 milliards d'hectares pour la production alimentaire (2,174 pluviale + 0,413 irriguée) et 0,565 milliards d'hectares pour la production de bioénergie. Même si l'on n'inclut pas la production de bioénergie, il faudra augmenter d'un milliard d'hectares la superficie cultivée afin de nourrir la planète. Les écosystèmes naturels auront diminué de 2,578 milliards d'hectares en 2000 à 1 milliard en 2050, ou à 1,565 milliard sans la production de bioénergie. Pour conclure, l'eau ne sera probablement pas le facteur limitant, devant la croissance démographique actuelle sur la planète; il y aura suffisamment de terres et d'eau pour produire la nourriture nécessaire en années normales, mais au prix de :

- un commerce gigantesque « d'eau virtuelle » entre les continents, puisque l'Asie, le Moyen-Orient et l'Afrique du Nord ne pourront pas se suffire à elles-mêmes, mais devront importer de la nourriture, principalement d'Amérique Latine;
- une réduction dramatique de la biodiversité et des écosystèmes naturels dans le monde entier.

4.2 Économiser l'eau en agriculture

En agriculture, il ne sera probablement pas efficace de tenter de réduire la consommation d'eau en réduisant la transpiration

Tableau 8. Un scénario possible pour la production alimentaire (en Mt) en 2050, (d'après GRIFFON, 2006).
Table 8. One possible scenario for food production (in Mt) in 2050 (from GRIFFON, 2006).

Région	Asie	Amérique du Sud	Moyen-Orient et Afrique du Nord	Afrique Sub-Saharienne
Besoins alimentaires	4 150	520	390	1 350
Production alimentaire	3 190 ±100	1 704 ±100	166 ±10	1 350
Déficits/Excédents	-960 ±100	+1 184 ±100	-224 ±10	0

Tableau 9. Superficies des terres cultivées par continent en 2050, pour la production de nourriture et d'énergie et les terres protégées restantes, en millions de ha (d'après GRIFFON, 2006).
Table 9. Cultivated surface areas per continent in 2050, for food and energy production and remaining protected areas, in million ha (from GRIFFON, 2006).

Zone	Asie	Amérique du Sud	Moyen-Orient Afrique du Nord	Afrique Sub-Saharienne	OECD	Russie et CIS	Total
Surfaces cultivables	585	1 066	99	1 031	874	497	4 152
Zones protégées	100	300	0	200	300	100	1 000
Surfaces agricoles	460	646	99	711	424	247	2 587
Irriguées	250	26	49	17	24?	47?	413
Pluviales	210	620	50	694	400?	200?	2 174
Cultures énergétiques	25	120	0	120	150	150	565

des plantes. Comme l'a montré par exemple Tardieu (2005), il est possible de réduire les pertes par évaporation des feuilles, mais cela diminuerait aussi la consommation de CO₂ par les feuilles à travers les mêmes stomates et donc la production de biomasse. Il n'y a pas de méthode connue pour réduire l'une sans influencer l'autre, même avec des OGM. On ne peut économiser l'eau qu'en réduisant les pertes entre l'eau réellement utilisée par la plante et celle amenée au champ : l'évaporation dans l'atmosphère (aspersion et sols nus irrigués) et infiltration dans le sol. Cependant, l'infiltration dans le sol n'est pas vraiment une perte; l'aquifère sous-jacent est alimenté et l'eau peut être réutilisée ou s'écoulera dans les rivières. Les plus importantes économies d'eau en agriculture viendront de changements de types de cultures et de régimes alimentaires, comme le montre le tableau 10, d'après ACADÉMIE DES SCIENCES (2006).

Ce tableau montre clairement qu'un régime carné utilise beaucoup plus d'eau et de sol qu'un régime végétarien, tous les aliments n'ont pas la même efficacité en ce qui concerne les besoins en eau. Par exemple, nourrir les volailles avec du maïs est environ deux fois plus efficace que de leur donner du riz ou du blé. Pour économiser de l'eau, il faut s'occuper de la question des régimes alimentaires des humains ainsi que de celle de l'efficacité hydrique des végétaux cultivés.

Une autre source potentielle d'économie est la lutte contre le gaspillage, principalement dans les pays développés, où l'on considère que 30 % de la nourriture produite est jetée, et également dans les pays en voie de développement, où une très large part des récoltes (jusqu'à 50 % ?) est perdue par mauvaise conservation (à la récolte, humidité, rongeurs,

etc.). La surconsommation énergétique des population des pays développés, qui conduit à l'obésité, est non seulement un gaspillage, mais aussi un problème grandissant de santé publique, qui est en train de s'étendre aux pays en voie de développement (DELPEUCH *et al.*, 2006).

4.3 Risques de sécheresses à l'échelle mondiale

Le Monde a une longue expérience de forte variabilité climatique, comme par exemple les sept années de vaches maigres et les sept années de vaches grasses dans la Bible. Des études archéologiques menées simultanément en Chine et en Grèce semblent montrer qu'une sécheresse grave a sévi dans ces deux pays aux alentours de l'année 400 AD. Il est probable que ce genre d'événements se reproduira; la question est : est-ce qu'ils affecteront gravement la production alimentaire et vont-ils se produire simultanément sur plusieurs continents? En 1998, après un épisode El Niño très intense, la production céréalière en Chine et en Indonésie a connu simultanément de grands déficits. Ces deux pays ont pu importer les céréales nécessaires à partir des réserves mondiales et aucune conséquence négative n'a été ressentie; les réserves mondiales de céréales, de l'ordre de 400 millions de tonnes, c'est-à-dire environ deux mois de la consommation mondiale actuelle, sont tombées à un niveau très bas mais elles ont suffi. Ces réserves sont en constante diminution depuis quelques années et, en conséquence, les prix des céréales ont fortement augmenté en 2006 (+31 % pour le blé et 67 % pour le maïs exportés des États Unis) et ils continuent de monter en 2007.

La théorie actuelle est que les sécheresses se reproduiront dans le futur, comme elles l'ont fait auparavant, mais pas en même

Tableau 10. Quantité d'eau nécessaire à la production alimentaire. Valeurs moyennes utilisées en m³ t⁻¹ pour produire la nourriture brute (fraction consommée, non en matière sèche). (D'après ACADÉMIE DES SCIENCES, 2006).

Table 10. Water needed for food production. Average values of water used in m³ t⁻¹ to produce raw food (consumed fraction, not in dry matter). (From ACAD. SCIENCES, 2006).

Produits végétaux	Besoins en eau (m ³ t ⁻¹)	Produits animaliers	Besoins en eau (m ³ t ⁻¹)
Huile végétale	5 000	Bœuf	13 000
Riz	1 500 – 2 000	Volailles	4 100
Blé	1 000	Œufs	2 700
Maïs	700	Lait	800
Agrumes	400		
Maraîchage	200 – 400		
Pommes de terre	100		

temps sur tous les continents : une période de sécheresse ici sera compensée par une production normale ou supérieure ailleurs, de manière à ce qu'il n'y ait pas de véritable pénurie mondiale de nourriture. Ceci peut être vrai la plupart du temps, mais regardons un instant l'histoire. Il est bien connu, par exemple, que la très forte éruption volcanique du Krakatoa en 1883 a eu un effet mondial sur la température et les précipitations (une baisse mondiale de 5 % des précipitations est souvent citée). En 2001, M. Davis a publié une analyse historique des famines au XIX^e siècle, où il décrit deux épisodes majeurs de sécheresse en 1876-1878 et en 1896-1900, qui ont affecté simultanément au moins l'Australie, le Brésil, la Chine, l'Inde et l'Éthiopie (Figure 9). Contrairement à l'idée générale, dans ce cas, des épisodes de sécheresse se sont produits simultanément sur des continents différents; DAVIS (2001) met en relation ces sécheresses avec des événements El Niño très intenses affectant les zones de moussons.

Les conséquences des famines du XIX^e siècle ont été très graves; DAVIS (2001) indique, dans chaque cas, environ 30 millions de morts seulement en Chine et en Inde, ce qui veut dire environ 4 % de la population mondiale de l'époque (de l'ordre de 1,5 milliard en 1875). Le lauréat du Prix Nobel d'économie Amartya Sen (SEN, DRÈZE, 1999) a également analysé ces événements et déterminé que, dans la plupart des cas de sécheresse, ce qu'il appelle « déclin de disponibilité alimentaire », la cause principale de mort et de famine n'est,

en fait, pas le manque de nourriture, mais plutôt le manque de ressources économiques chez les paysans pauvres, dont les cultures (leur seule source de revenu) sont détruites et qui, par conséquent, n'ont plus les moyens d'acheter les produits alimentaires, qui deviennent trop chers. Il a montré, par exemple, que ceci est arrivé en Éthiopie en 1975, quand une grande sécheresse, accompagnée d'un désastre agricole dans une partie du pays, a engendré une sévère famine et de nombreux morts tandis que, dans d'autres régions du même pays, la nourriture était disponible et même les moyens de la transporter jusqu'à la zone de famine, qui était située le long d'une route principale.

À ce propos, il est intéressant d'examiner l'historique des fréquences observées d'événements El Niño très intenses. ORTLIEB (2000) a essayé de reconstruire, à partir d'archives historiques en Amérique Latine, quelles ont été les années d'événements El Niño forts et très forts (en gras) de 1525 à 1950 (plus 1998), comme suit :

1539, 1546, 1552, 1559, 1567, 1574, 1578, 1589, 1600, 1604, 1607, 1614, 1618, 1621, 1630, 1640, 1650, 1652, **1661**, 1671, 1681, 1687, **1694**, 1703, 1715, 1723, **1728**, 1737, 1747, 1761, 1776, **1782**, **1790**, 1802, 1814, 1824, 1827, 1832, 1837, **1844**, 1850, 1854, 1864, 1867, **1876**, **1877**, 1887, **1891**, **1899**, 1904, 1913, 1918, 1925, **1940**, **1998**.

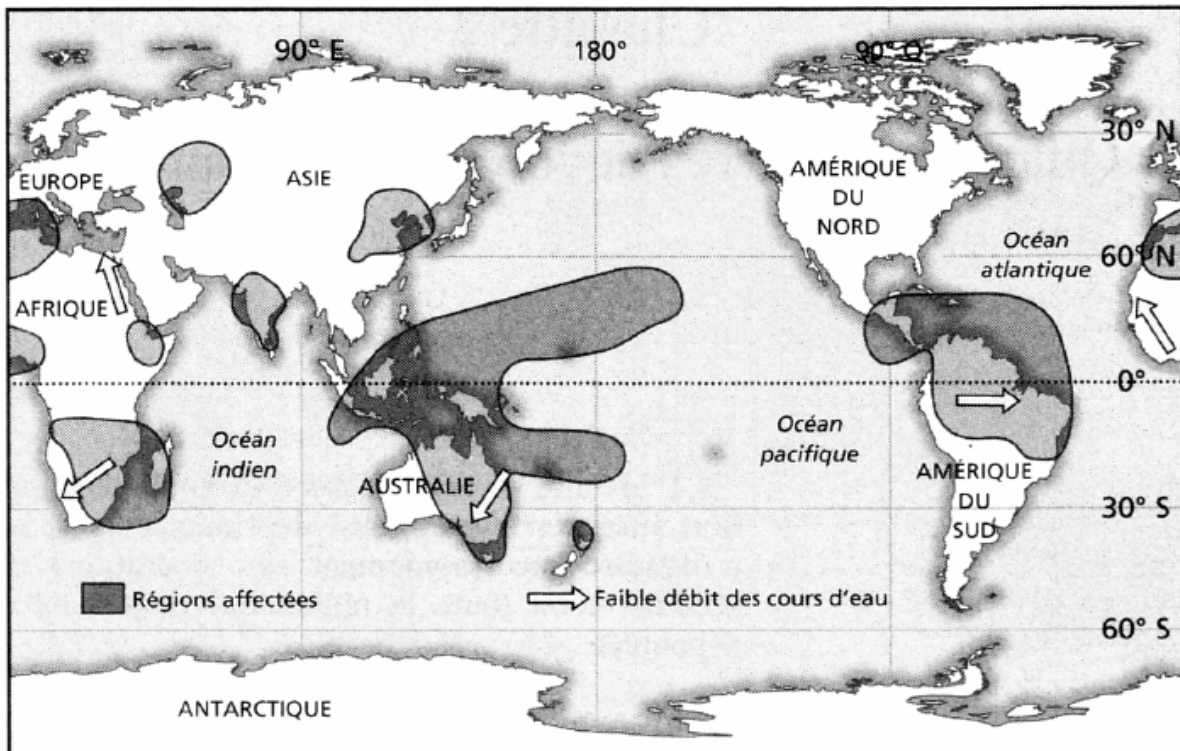


Figure 9. Les zones de mousson affectées par la sécheresse de 1876-1878 (DAVIS, 2001).
The monsoon zones affected by the drought of 1876-1878 (DAVIS 2001).

On voit sur cette liste que 1876, 1877 et 1899 ont en effet été des années El Niño très fortes, comme le dit DAVIS (2001), mais aussi que, en moyenne, de tels événements El Niño très intenses se produisent environ deux fois par siècle : ils sont donc relativement rares.

Pour conclure, on voit de cette brève analyse qu'une ou deux fois par siècle, ou peut-être plus souvent, si les changements climatiques influencent la variabilité d'El Niño, une période de grande sécheresse, qui dure plusieurs années, peut affecter simultanément différents continents et influencer la production de produits alimentaires à l'échelle mondiale. Il est probable que les réserves de nourriture ne suffiront alors pas à satisfaire la demande, puisque les réserves actuelles, qui représentent environ deux mois de consommation mondiale, seront vite épuisées et leur transport à des régions lointaines sera toujours compliqué. Les prix des aliments sur le marché international deviendront subitement très élevés et le « Déclin de disponibilité alimentaire » deviendra une réalité, qui générera des famines d'une magnitude inconnue. Les pays pauvres ou les communautés rurales pauvres exposés à la sécheresse seront les premières victimes mais probablement pas les seules. Il n'y a pas de raison de penser que ceci ne peut pas se produire. Toutefois, nous ne savons pas quand : l'année prochaine? Dans dix ans? La seule façon possible de prévenir une telle catastrophe serait d'accroître considérablement les réserves alimentaires mondiales. Mais où peuvent-elles être stockées, et qui payera?

5. ÉCOSYSTEMES ET BIODIVERSITÉ

Aussi bien le changement climatique que la croissance démographique affecteront les ressources en eau et l'occupation des terres sur la Planète. Cependant, les humains ne sont pas les seuls à « utiliser » cette eau; les écosystèmes et des millions d'espèces ont besoin d'eau et d'espace, comme le montre la figure 10. Il est nécessaire de rappeler ici que les écosystèmes naturels sont autorégulés pour utiliser toutes les ressources auxquelles ils ont accès. Sur terre, les précipitations sont utilisées par la végétation naturelle, et dans les cours d'eau et les lacs, les biotopes s'adaptent à la ressource disponible. Même dans les zones côtières, le flux d'eau douce est utilisé par les écosystèmes amphi-halins. Quand les humains sont arrivés et ont commencé à utiliser la terre et les eaux pour leurs propres besoins, c'était toujours aux dépens d'un écosystème, qui s'est trouvé obligé de réduire sa part de la ressource. En Europe, par exemple, une déforestation majeure a eu lieu au Moyen Âge, réduisant la biodiversité et la part laissée aux écosystèmes naturels. Aujourd'hui, une déforestation semblable s'opère par exemple, en Amérique Latine, en Afrique et dans les pays nordiques, menaçant sérieusement la biodiversité, en particulier aux « points chauds » des forêts tropicales. D'après le tableau 9, selon un des scénarios de production de nourriture et de bioénergie, le Monde subira une réduction de 1,5 milliards d'hectares d'écosystèmes naturels dans les prochaines 50 années,



Figure 10. Le delta d'Okavango, Namibie, d'après KINZELBACH (2006).
The Okavango delta, Namibia, from KINZELBACH (2006).

et ne gardera que 1 milliard d'hectares pour la conservation. Est-ce que cela sera suffisant pour maintenir la viabilité de la planète?

À l'échelle de l'Europe, il semble qu'une augmentation de la production de nourriture et de bioénergie sera indispensable pour assurer nos propres besoins alimentaires et énergétiques ainsi que ceux d'autres continents. Toutefois, la protection des écosystèmes et de la biodiversité devra également être une priorité : il faudra déterminer la part minimum d'eau nécessaire au maintien d'écosystèmes sains en Europe, et ils devront être considérés comme « utilisateurs » à part entière de nos ressources en eaux. Ceci sera particulièrement pertinent en situations de sécheresse, où les écosystèmes devront figurer haut sur la liste des allocations d'eau des autorités, probablement avant l'agriculture. Il est certainement pénible de perdre une année de récoltes, mais celles-ci peuvent être compensées financièrement et les conséquences pour l'année d'après seront minimales, tandis que la détérioration d'un écosystème peut être irréversible ou demander plusieurs années pour récupérer.

6. CONCLUSIONS

Selon nos connaissances actuelles des effets des changements climatiques et de la demande accrue de nourriture sur le cycle de l'eau, les conséquences probables de ces changements seront les suivantes :

Dans des conditions normales

- Augmentation des ressources en eaux en Europe du Nord, Russie, Amérique du Nord et la zone tropicale, permettant une production agricole plus élevée.
- Forte diminution des ressources en eaux en Europe du Sud, Asie du Sud-Est, Amérique du Sud et Australie avec des effets sévères sur la production agricole.

Etant donné la demande croissante de nourriture dans le monde, due à la croissance démographique et au changement des habitudes alimentaires, l'augmentation de la production agricole doit être une priorité majeure. Bien que l'on puisse s'attendre à certaines économies d'eau de la part de l'agriculture, ainsi que des améliorations sensibles de l'efficacité des cultures, il est fort probable qu'il faille produire davantage en développant l'agriculture pluviale en Afrique et en Amérique Latine où des terres cultivables sont encore disponibles, engendrant un commerce considérable « d'eau virtuelle ». Les écosystèmes naturels subiront des impacts importants, ce qui menacera la biodiversité dans une mesure qui n'a pas encore été évaluée. Il faudra également augmenter l'irrigation, ce qui demandera des transferts sur de longues distances ou des stockages supplémentaires d'eau (par exemple, par barrages ou dans les aquifères par recharge artificielle et réutilisation des eaux usées).

L'alimentation en eaux domestique et industrielle sera, en revanche, un problème mineur, qui pourra être résolu par des économies d'eau ou des technologies nouvelles. Des économies de nourriture et des restrictions de régimes alimentaires devront être mises en oeuvre.

Dans des conditions extrêmes

Les fréquences des crues et des sécheresses sont très incertaines. Les deux continueront à se produire, avec ou sans changements climatiques. Les connaissances actuelles des effets des changements climatiques sur la fréquence des sécheresses et des crues sont, en effet, trop limitées pour permettre une analyse quantitative valable; ce qui semble le plus probable est que la fréquence des sécheresses s'intensifiera, en particulier dans la zone aride, tout comme celle des crues, particulièrement dans les pays nordiques et sous les tropiques.

Des plans de sécheresse doivent donc être développés et des mesures adéquates prises dès le début d'une période de sécheresse, afin d'assurer des économies d'eau et d'allouer l'eau à des usagers prioritaires, parmi lesquels les écosystèmes devront occuper un rang prééminent si l'on veut protéger la biodiversité.

Les réserves de nourriture doivent être augmentées et stockées près des zones de moussons en préparation à des périodes de sécheresse touchant toutes les parties du monde, comme celles que nous avons vues par le passé pendant des événements El Niño très intenses.

Perspectives de recherches

Les sociétés sont bien plus vulnérables aux changements hydrologiques qu'à ceux qui ne concernent que la température. Ainsi, des efforts soutenus de recherche sont toujours nécessaires dans le domaine de la modélisation du climat, de l'analyse des événements extrêmes, de la paléoclimatologie, afin de mieux contraindre les effets prévus du changement climatique sur le cycle de l'eau. De gros efforts internationaux sont indispensables pour collecter les données et les rendre disponibles à la recherche sur le climat (les données hydrologiques ne sont plus disponibles, ni dans les pays développés, ni dans ceux en voie de développement, parfois par manque de suivi, mais généralement parce que les données hydrologiques et météorologiques sont maintenant considérées comme des propriétés commerciales et vendues très cher).

Il manque des scénarios opérationnels, qui font le bilan besoins-ressources pour les prochaines 10 à 50 années, région par région, en tenant compte des prélèvements, de la consommation, du recyclage et de la qualité de l'eau. Un tel scénario devrait inclure :

- les prévisions d'activités agricoles en fonction des marchés, des régimes, des progrès techniques, etc;
- les besoins en eaux des écosystèmes, qui devront être pris en compte en tant que composante prioritaire des besoins en eaux, aussi bien dans des conditions normales qu'en cas de sécheresse;
- les autres demandes en eaux, par exemple demandes industrielles, refroidissement des centrales thermiques, etc.;
- les conséquences prévues des changements climatiques;
- la protection contre les crues et les inondations possibles à la suite d'une augmentation de la variabilité climatique;
- des plans pour affronter des conditions de sécheresses sévères.

Pour les hydrologues, la nature de leur tâche principale doit dépendre de la région géographique de leurs travaux. Dans les zones sèches, la meilleure solution n'est probablement pas d'essayer d'extraire l'eau jusqu'à la dernière goutte : il est plus important de considérer le cycle de l'eau à long terme et de se préparer à stocker l'eau excédentaire, quand il y en a (dans des barrages ou par recharge artificielle, etc.) pour s'en servir pendant les années sèches ou très sèches. Pour gérer un aquifère, il faudra concilier des demandes opposées : baisser le niveau des nappes pour y gagner la place de stockage en période de hautes eaux et, en même temps, ne pas baisser trop, afin de toujours garder des réserves pour des années anormalement sèches. Comme beaucoup de pays dans la zone aride ne pourront pas produire assez de nourriture pour alimenter leurs populations, devant donc recourir à « l'eau virtuelle », il devient important de déterminer quel est le meilleur usage de l'eau pour leur développement : la production alimentaire ou d'autres activités économiques qui peuvent générer les moyens d'acheter la nourriture?

S'agissant de la construction de barrages, plus ils sont en altitude, mieux c'est : les pertes par évaporation seront moindres et peut-être que l'impact du barrage sur les écosystèmes sera plus faible, car ils peuvent être moins développés en altitude que dans les fonds de vallées. Dans les pays nordiques, les risques plus forts de crues nécessitent que les évacuateurs de crues des barrages soient réexaminés et qu'une réflexion soit engagée sur la gestion des crues, la prévention des inondations et la limitation de la vulnérabilité.

Une autre priorité est la conservation des sols car la disponibilité des sols sera un des facteurs majeurs dans la production alimentaire. Il faut aussi empêcher une augmentation de la salinisation (par exemple, par drainage) ainsi que l'érosion du sol, sa dégradation (par exemple, la perte de matière organique, qui augmente l'érosion et empêche l'infiltration par la création d'une croûte de battance). Il faudra aussi réfléchir à la gestion du paysage, par exemple, créer des banquettes en courbes de niveau, qui diminuent l'érosion et augmentent l'infiltration.

Toutefois, l'objectif final de la gestion de l'eau au XXI^e siècle devra être de protéger et maintenir la biodiversité. Elle est probablement la ressource la plus fragile et la plus menacée de la Planète, beaucoup plus que l'eau et le sol. Le souci urgent pour la recherche est de pouvoir prédire l'état et la santé futurs des écosystèmes sous toutes les formes possibles de développement de l'agriculture, de l'urbanisme et des industries. Quelles mesures compensatoires seraient nécessaires pour garantir la survie des écosystèmes? Devrait-on établir un minimum de territoires protégés pour sauvegarder la nature? Quand des signes alarmants apparaissent, peut-on restaurer un écosystème en péril avant qu'il ne disparaisse? Ces questions sont aujourd'hui sans réponses et, pour y répondre, il faudra une collaboration étroite entre les hydrologues et les écologistes.

7. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ACADÉMIE DES SCIENCES (2006). *Les eaux continentales*, coordonné par G. de Marsily. EDP Sciences, Paris, France.
- COLLOMB, P. (1999). Une voie étroite pour la sécurité alimentaire d'ici à 2050. FAO, *Economica*, Paris.
- COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES (2007). *Impact assessment*. Accompanying document to the communication from the Commission to the Council and the European Parliament «Addressing the challenge of water scarcity and droughts in the European Union», Report COM(2007) 414 final, July 2007.
- DAVIS, M. (2001). *Late victorian holocausts, El Niño famines and the making of the third world*, Verso, London, UK (disponible en français, Génocides tropicaux, la découverte, Paris, France, 2003 et 2006).
- DELPEUCH, F., B. MEURE, et E. MONNIN (2006). *Tous obèses*. Dunod, Paris, France, 2006.
- DUFRESNE, J.L., P. FRIEDLINGSTEIN, M. BERTHELOT, L. BOPP, PH. CIAIS, L. FAIRHEAD, H. LE TREUT et P. MONFRAY (2002). On the magnitude of positive feedback between future climate change and the carbon cycle, *Geophys. Res. Lett.*, 29, 10, 43-1 - 43-4.
- ECOLOGIC (2007). *EU watersaving potential* (Part 1 - Report) ENV.D.2/ETU/2007/0001r 19. July 2007. Authors : T. DWORAK, M. BERGLUND, C. LAASER (Ecologic), P. STROSSER, J. ROUSSARD, B. GRANDMOUGIN (ACTeon), M. KOSSIDA, I. KYRIAZOPOULOU (NTUA), J. BERBEL, S. KOLBERG, J.A. RODRÍGUEZ-DÍAZ, P. MONTESINOS (Universidad de Córdoba). Ecologic, Berlin, Germany.

- EUROPEAN COMMISSION (2007). *Communication to the Council and the European Parliament: Addressing the challenge of water scarcity and droughts in the European Union*, Impact Assessment com. (2007), 414 final.
- FAO (2006). <http://www.fao.org/newsroom/fr/news/2006/1000282/index.html>.
- GIEC - IPCC (2001). *Climate change 2001: the scientific basis*. Intergovernmental panel on climate change. Contribution of working group I to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change (HOUGHTON JT., Y. DING, D.J. GRIGG, M. NOGUER, P.J. VAN DER LINDEN, X. DAI, K. MASKELL et C.A. JOHNSON (éditeurs)). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- GIEC-IPCC(2007). *Fourth assessment report*. Intergovernmental panel on climate change, Genève, Suisse. Working Group 1, Chapitre 3 «Observations: Surface and atmospheric climate change», <http://ipcc.ch/index.html>. Chercher Working Group I Report, Full Report, Chapter 3. Version papier en 2008.
- GRIFFON, M. (2006). *Nourrir la planète*. Odile Jacob, Paris, France.
- IWMI (2007). *Water for food, water for life: a comprehensive assessment of water management in agriculture*. MOLDEN, D. (éditeur). International Water Management Institute Colombo, Sri Lanka. Publié par Earthscan, London, UK
- KINZELBACH, W. (2006). *État global des ressources en eau et gestion durable*. Conférence à Cargèse, Corse, 27 juillet 2006.
- LAMBERT, S.J. et G.J. BOER (2001). CMIP1 evaluation and intercomparison of coupled climate models. *Clim. Dyn.*, 17, 83-106.
- MARSILY, G. de (2000). *L'eau*. Collection Dominos, Flammarion, Paris, France, 130 p.
- ORTLIEB, L. (2000). The documented historical period of El Niño events in Peru: an update of the Quinn record (16th to 19th centuries). Dans : *El Niño and the southern oscillation. Multiscale variability and local and regional impacts*. DIAZ, H.F. et V. MARKGRAF (éditeurs). Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 207-295.
- SEN, A. et J. DRÈZE (1999). *Omnibus*. Oxford University Press, New Delhi, India.
- SHIKLOMANOV, I.A. (1999). *World water resources and their use*. State Hydrological Institute, Moscow, Russia, et Unesco, Paris, France.
- TARDIEU, F. (2005). Plant tolerance to water deficit: physical limits and possibilities for progress. Dans : Académie des Sciences, *CR, Geosci.*, 337, 57-67.
- VIVIROLI, D., H.H. DÜRR, M. MEYBECK, R. WEINGARTNER et B. MESSERLI (2007). Mountains of the world – water towers for humanity: typology, mapping and global significance. *Water Resour. Res.* (sous presse).